

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315) 《环境科学》征稿简则 (3357) 信息 (3391, 3441, 3564)	

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化

张发文¹, 董明坤¹, 陈辰慧¹, 赵长民²

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2. 河南省郑州市生态环境监测中心, 郑州 450007)

摘要:以城市生活污水污泥为研究对象,采用矿渣基改性剂在不同投加量和养护时间条件下对其改性,并通过重金属的稳定效率及形态变化分析和评价污泥中 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等重金属的固化效果. 结果表明:随养护时间或投加量的增加,重金属稳定效率不断提升,在养护 14 d 后,改性剂的投加量为 50% 时达到最大,其中 Cu 最高为 69.62%,Cr 最低为 48.68%,且皆在投加量为 5%~20% 时增长最快. 通过对投加量、养护时间和稳定效率回归分析,发现 Cu 的拟合相关系数最高为 0.97,改性剂的掺量与养护时间两个影响因素相互作用极强,对重金属稳定效率的增加均有显著的影响. 此外,污泥改性后 Pb 和 As 以残渣态为主; Cu 和 Cr 以可氧化态和残渣态为主; Zn 和 Cd 以可还原态和可提取态的形式为主. 随养护时间或投加量增加,各重金属的残渣态有 7%~86% 的增加,这表明矿渣基改性剂可有效固化污泥中重金属,使污泥等固体废物再利用.

关键词:污泥; 改性; 重金属; 稳定效率; 形态

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3430-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008202

Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent

ZHANG Fa-wen¹, DONG Ming-kun¹, CHEN Chen-hui¹, ZHAO Chang-min²

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Taking urban domestic sludge as the research object, a slag-based modifying agent was used to modify sludge under different dosages and curing times, and the solidification effect of six heavy metals in the sludge, namely Zn, Cr, Cu, Pb, As, and Cd, were evaluated by analyzing stability efficiency and morphological changes. The results showed that the stability efficiency improved as curing time and dosage increased, reaching the maximum when the curing time was 14 d and the dosage was 50%. Under these conditions, Cu reached the maximum of 69.62%, and the most rapid growth was observed when dosages were 5%-20%. Through the regression analysis of adding amount, maintenance time and stability efficiency, it was found that the fitting correlation coefficient Cu was the highest 0.97, with a strong degree of fitting and a strong interaction between adding amount and maintenance time, which had a significant influence on the stability efficiency. In addition, Pb and As were the residual state, Cu and Cr were oxidizable state and residue state, Zn and Cd were reducible and extractable state as the main forms in the sludge after modifying, respectively. With the increase of curing time or dosage, the residual state of each heavy metal increased by 7%-86%. The results showed that the slag-based modifying agent could effectively solidify heavy metals in sludge and reused solid wastes such as sludge.

Key words: sludge; modifying; heavy metals; stability efficiency; morphology

根据文献[1]预测,到 2020 年含水率为 80% 的污泥无害化处置规模将达到 9.75 万 t·d⁻¹,无害化处置是污泥稳定化的基本要求,而污泥中重金属的稳定化情况是限制污泥无害化处理的一大因素. 为了减轻城市污泥带来的环境污染和消除污泥中重金属的潜在危害,国内外学者在污泥重金属固化稳定化方面^[2~5],目前以石灰、粉煤灰或水泥等作为主要固化材料的研究居多. 李翔等^[6]的研究发现石灰干化污泥可有效降低土壤中 Zn、Pb 和 Cd 的可交换态,从而限制其迁移,当石灰干化污泥的质量分数为 40% 时,稳定化率最大为 Zn (99.54%)、Pb (99.60%) 和 Cd (99.85%); Samaras 等^[7]的研究发现经石灰和粉煤灰稳定固化后的污泥中重金属已达要求,可用作土壤改良剂; Lim 等^[8]的研究发现以石灰、粉煤灰和黄土作为改性剂可显著稳定污泥中的 Pb、Cu 和 Cr,使其显著低于规定标准. 有专利技

术表明,干污泥、稻壳灰(成分类似硅灰或粉煤灰)和水泥烧制一种污泥混烧灰可稳定污泥中 Cr、Cu 和 Zn 等重金属^[9]; Graich 等^[10]的研究发现硅酸盐水泥可使污泥残渣中的 As、Ni、Zn、Pb、Cu 和 Cr 等 8 种重金属浸出浓度远低于极限值,且可使最初存在于污泥中的 As、Co、Mo、Ni 和 Pb 不浸出. 但在采用常规胶凝材料用于污泥重金属稳定化时,存在资源消耗大、成本高等缺点,因此,亟需针对污泥的特点研制一种对重金属稳定效果好和成本低的环保型改性材料.

收稿日期: 2020-08-19; 修订日期: 2020-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008118); 河南省高等学校重点科研项目(18B610001); 河南省高校国家级大学生创新创业训练计划项目(202010466004); 河南农业大学科技创新基金项目(KJCX2017A04)

作者简介: 张发文(1981~),男,博士,副教授,主要研究方向为固体废物处理与资源化利用, E-mail: zhangfawen@henau.edu.cn

矿渣是高炉炼铁过程中产生的副产品,主要物相为含量在 80%~90% 的玻璃体和少量结晶相,通过国内外对矿渣基胶凝材料的相关研究可知^[11~15],其潜在活性在激发剂的作用下,发生水化反应形成的水化产物具有网状结构,能够有效地固封重金属离子. 张大捷等^[16]的研究发现矿渣水化后产生的水化硅铝酸钙等沸石类矿物通过吸附作用和阳离子交换作用对飞灰中的重金属有良好的稳定化作用,能够降低重金属的浸出浓度; 申锐莉等^[17]的研究发现矿渣、稻壳灰、熟料及化学外加剂固化 Pb 污染土壤,微观结构分析表明 C-S-H 凝胶对溶解态 Pb 有较大的吸附性,Pb 以 Pb²⁺ 的形式进入了 C-S-H 晶格; Huang 等^[18]用高炉矿渣制备碱激发胶凝材料对铬渣进行固化/稳定化处置,当铬渣的添量不超过 60% 时,铬渣固化体中 Cr⁶⁺ 的浸出毒性均低于规定的限值; 何哲祥等^[19]用高炉矿渣作为污染土壤的固化剂,水化产物 C-S-H 凝胶有利于重金属的吸附和包裹固化,使有效态 Zn、Cr 和 Pb 的质量分数分别降低了 64.08%、66.37% 和 57.15%. Jin 等^[20]研

究了活性 MgO 激发的矿渣胶凝材料对 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的固结机制, Zn²⁺ 和 Pb²⁺ 的固结效率分别高达 99.98% 和 100%.

为了实现高炉矿渣和城市生活污水的双重资源利用,达到“以废治废”的目标. 因此本文以城市生活污水为研究对象,采用矿渣等工业废渣作为主要原料制备矿渣基改性剂,通过不同的掺入量和养护时间两个因素,对城市污泥进行改性试验,从污泥改性前后 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 这 6 种重金属浸出浓度和形态变化情况,探讨矿渣改性剂对污泥中不同重金属的稳定效果及其潜在迁移性变化规律,对污泥进行下一步资源无害化利用提供理论依据与指导.

1 材料与方法

1.1 污泥

供试的污泥取自郑州市某污水处理厂的机械脱水后的城市污泥,样品呈灰黑色,有异味并略显弹性. 污泥的基本性质参数测定结果见表 1,其化学成分分析见表 2.

表 1 污泥的基本性质

Table 1 Basic properties of sludge

项目	pH 值	含水率/%	湿污泥密度 /g·cm ⁻³	干污泥密度 /g·cm ⁻³	有机质/%
平均值	7.15 ± 0.45	79.64 ± 3.67	1.08 ± 0.07	1.59 ± 0.05	38.56 ± 4.21

表 2 污泥的化学成分/%

Table 2 Chemical compositions of sludge/%

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
数值	49.14	7.70	5.49	10.31	5.78	2.45	0.75

1.2 矿渣基改性剂的制备

改性剂以矿渣为主要原材料,并掺入熟料、粉煤灰及活性激发剂,按照质量比为 58:27:12:3 进行配料,将原料掺和后,粉磨大约 20 min 制得矿渣基改性剂. 其中矿渣取自河南某钢铁厂高炉矿渣,熟料取自河南某水泥厂,粉煤灰取自河南某发电厂,其原料化学成分见表 3.

1.3 污泥的改性处理

在室温 20℃ 条件下,将制备好的矿渣基改性剂

分别按 5%、10%、15%、20%、30%、40% 和 50% 的质量分数掺入原污泥中,并通过搅拌机搅拌 5 min 后取出改性污泥,将其置于密闭容器中,在相对湿度 ≥95% 和温度 (20 ± 1)℃ 条件下的标准养护室继续养护至 4 h、1 d、3 d、7 d 和 14 d. 取出改性后的污泥于烧杯中,在恒温鼓风干燥箱中 40℃ 低温烘干至恒重,将其在研钵中研磨过 2 mm 筛,充分混匀后置于塑料自封袋中,贴标备用. 每个处理设 3 个重复样,试验结果取平均值.

表 3 改性剂原料的化学成分/%

Table 3 Chemical compositions of sludge/%

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
矿渣	41.23	13.54	1.89	6.85	29.14	1.09	0.81
熟料	21.48	4.72	1.12	3.70	56.62	0.54	1.00
粉煤灰	47.55	31.97	10.80	0.83	4.06	0.64	0.64

1.4 污泥改性前后毒性浸出试验

本试验参照 HJ 557-2010《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》^[21] 和 TCLP (U. S. EPA, Method-1311)^[22] 进行浸出毒性试验. 称取 10 g 过 2 mm 筛的原样污泥或改性后的污泥样品置于提取瓶中,按照液固比为 10:1 (L: kg) 比例加入 100 mL pH 为 2.64±0.05 的醋酸浸提剂,在室温下振荡 8 h,静至 16 h,取上清液过 0.45 μm 的滤膜,采用 ICP-OES (Optima 5300DV) 测定浸出液中的各重金属含量.

为了探讨矿渣基改性剂对污泥重金属的稳定化效果,本研究采用重金属稳定效率 η 来表示,其计

算公式为:

$$\eta = (c_{i0} - c_{i1}) / c_{i0} \times 100\%$$
 (1)

式中, η 为重金属稳定效率(%); c_{i0} 为原污泥中重金属 i 的浸出浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); c_{i1} 为改性后污泥重金属 i 的浸出浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

1.5 污泥改性前后重金属的形态分析

污泥中重金属的浸出毒性不仅与重金属的总量有关,还与其赋存的化学形态密切相关^[23,24]. 重金属形态分析采用改进的 BCR 顺序提取法,具体方法见表 4,上清液采用 ICP-OES 测试各重金属含量.

表 4 改进的 BCR 顺序提取法流程¹⁾

Table 4 Improved sequential extraction method of BCR

步骤	形态分类	1 g 待测样品所用的试剂	操作条件
1	可提取态	40 mL 0.11 mol·L ⁻¹ 醋酸溶液	室温振荡 16 h,离心后取上清液,4℃ 冷藏待测;将残渣留作下一步分析
2	可还原态	40 mL 0.5 mol·L ⁻¹ 盐酸羟胺溶液	室温振荡 16 h,离心后取上清液,4℃ 冷藏待测;将残渣留作下一步分析
3	可氧化态	10 mL 8.8 mol·L ⁻¹ 双氧水 50 mL 1.0 mol·L ⁻¹ 醋酸氨	室温振荡 1 h,水浴 85℃ 加热溶解 1 h,开盖蒸至近干,重复一次;冷却后加醋酸氨(用醋酸调节 pH=2),室温振荡 16 h,离心后取上清液,4℃ 冷藏待测;将残渣留作下一步分析
4	残渣态	4 mL 硝酸、10 mL 氢氟酸和 2 mL 高氯酸	将残渣于聚四氟乙烯烧杯中,在电热板上常压消解至澄清透明

1) BCR 顺序提取试验中离心转速 3 000 r·min⁻¹,时间 20 min,过滤用滤膜 0.45 μm

2 结果与讨论

2.1 污泥中重金属及其浸出毒性和形态分布

污泥中重金属 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 的含量如图 1 所示. 其中重金属 Zn 的含量最高,这与我国污水管道主要为镀锌材质有很大的关系,其次

是 Cr、Cu 和 Pb 含量相对较高,而且所测得的重金属含量均已高于全国污泥重金属含量平均值^[25]. 虽然毒性较强的 As 和 Cd 在污泥含量中较少,但其含量却高于《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ/T 309-2009)^[26] 中 A 类限值标准. 通过对污泥中重金属的浸出浓度进行测定,并与《危险废

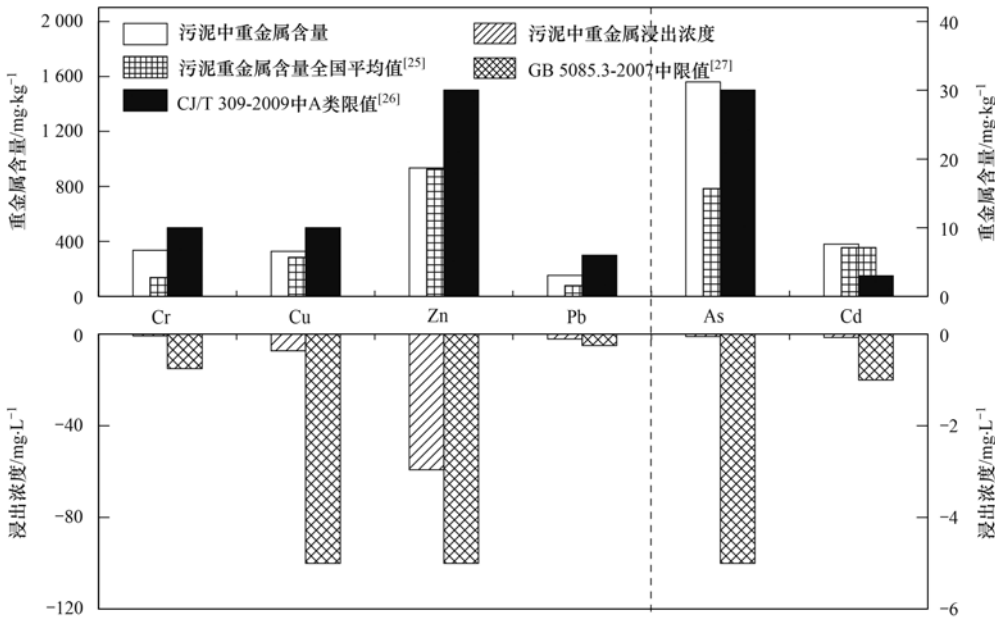


图 1 污泥中重金属总量及浸出浓度

Fig. 1 Total amount and leaching concentration of heavy metal in sludge

物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3-2007)^[27] 中重金属标准值比较,发现所有重金属均未超过限值.但从污泥中 6 种重金属的总量来看,污泥施用可能存在一定的风险,为防止其对环境造成二次污染,应在污泥后续的处置或资源化利用中,尤其是在污泥重金属的固化、稳定化方面给予更多的重视.

不同重金属在污泥中主要的赋存形态也存在一定的差异性,结果见图 2.原样污泥中 Cr 和 As 主要以残渣态存在,且质量分数均超过 50%,而残渣态的 Cr 和 As 在一般条件下难以迁移转化,活性相对较低,这与 Shikazono 等^[28]的研究结果是一致的. Zn 和 Cd 主要是以可提取态存在,其质量分数分别为 54% 和 71%,这说明 Zn 和 Cd 在污泥中的生物活性较高,存在较大潜在生态危害,应该对其加强防控. Cu 和 Pb 主要以可还原态存在,且质量分数均超过 60%,于贺等^[29]的研究表明可还原态所占比例较多的重金属容易在酸性或还原条件下转化成其他可能对环境造成二次伤害的物质,从而对生态造成较大威胁,也应加以重视.

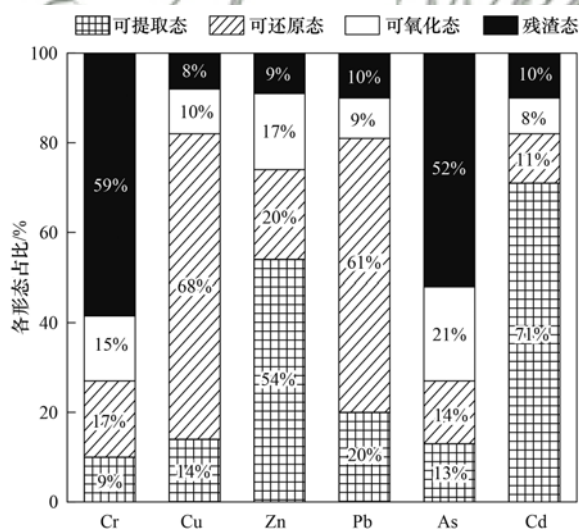


图 2 污泥原样重金属形态分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in original sludge samples

2.2 污泥改性前后重金属浸出浓度的变化

2.2.1 养护时间对污泥中重金属稳定效果的影响

污泥在掺入不同量的改性剂后,改性污泥中重金属的稳定效率随着养护时间延长的变化情况见图 3.

由图 3 可以得出,当改性剂掺量相同时,随着养护时间的增加,Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等 6 种重金属的稳定效率也在不断提高,说明改性剂对重金属的固化效果明显,均在养护 14 d 后达到最高稳定效率,其中 Cu 的稳定效率最高,达到 69.62%,Cr 最低为 48.68%.当改性剂的掺量为 20% 时,Zn、Cr、

Cu 和 Cd 的稳定效率增加最明显,养护 14 d 后,分别增加 14.19%、13.01%、13.02% 和 12.50%.因此添加以矿渣为主要原料,粉煤灰等工业废渣为辅助的改性剂可有效固化污泥中重金属,这与李翔等^[6]关于石灰干化污泥对污染土壤中重金属稳定效果显著的研究一致,在石灰干化污泥质量分数较小情况下稳定效果也比较显著.这说明随着养护时间的延长,改性剂进一步与污泥发生水化反应从而使重金属稳定效率显著增加.

2.2.2 掺量对污泥中重金属稳定效果的影响

在相同养护时间的条件下,污泥中重金属稳定效率随着改性剂掺量的变化曲线见图 4.

由图 4 可见,污泥中 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等 6 种重金属稳定效率均随改性剂掺量的增加而提高,当掺量为 5%~20% 时,重金属的稳定效率增长最快,之后增长慢慢变缓,在掺量为 50% 时达到最大稳定效率,其中 Cu 的稳定效果最好,稳定效率可达 69.62%.养护 3 d 后,污泥中 Pb、As 和 Cd 稳定效率的增长最为明显,掺量增加至 50% 时稳定效率分别增加 40.05%、46.65% 和 41.35%.因此添加改性剂可使污泥中的重金属得到有效固化,这与陈巍^[30]关于改性剂可使重金属在其水化反应过程中浸出率降低,从而使其水化产物实现良好固化污泥中重金属的研究一致.所以随着改性剂掺量的增加对污泥中的重金属稳定效果就越好,改性剂通过一系列充分的水化反应使得污泥中的重金属形成不溶性的氢氧化物或者碳酸盐^[31],使其能够得到有效固化,但当掺量超过一定量时,重金属稳定效率则增长缓慢,逐渐趋于稳定.

2.2.3 掺量与养护时间的相互作用对稳定效率的影响

为分析污泥中不同重金属在添加改性剂后,掺量与养护时间的相互作用对重金属稳定效率的影响,采用绘制交互作用等高线及 3D 曲面图的方法,直观表示其交互作用对污泥中 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等 6 种重金属稳定效率的影响.图 5 中的颜色由蓝色向红色过渡时,表示稳定效率由低向高的变化过程.图 5(a1)~5(f1)中由等高线的形状可反映出各影响因素间相互作用的强弱,椭圆形和圆形分别代表相互作用明显与不明显,其中最小椭圆中心表示稳定效率的最大值,且等高线间距越窄越密集表示变化速度及曲面图坡度越大,对试验结果的影响越显著^[32].

根据试验结果绘制改性剂的掺量与养护时间相互作用等高线及 3D 非线性回归曲面(见图 5),

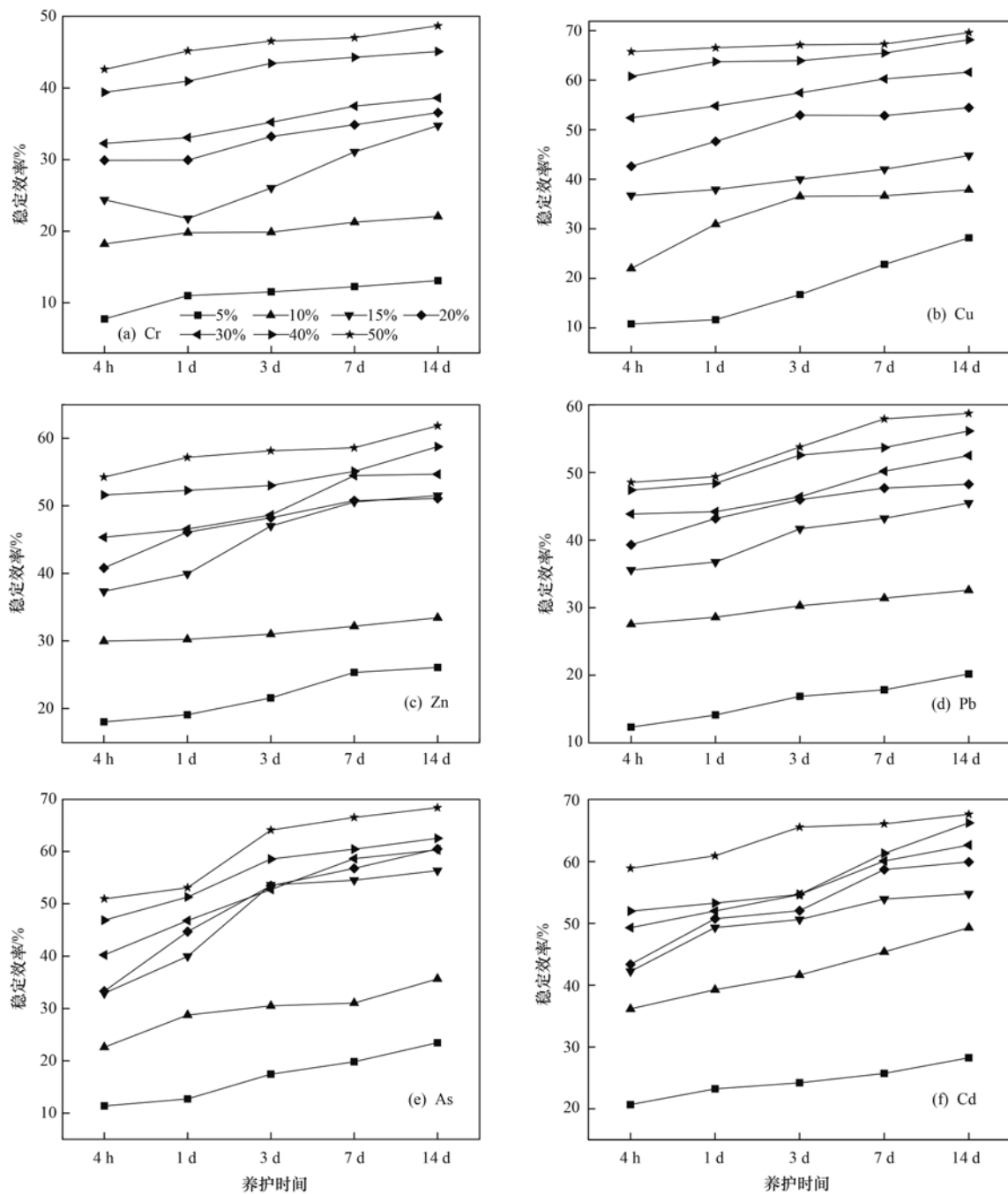


图3 不同养护时间下重金属稳定效率变化情况

Fig. 3 Variation in stability efficiency at different curing times

进一步探讨掺量和养护时间对重金属稳定效果的影响。

由图5可看出,污泥中Zn、Cr、Cu、Pb、As和Cd等6种重金属在添加改性剂后,改性剂的掺量与养护时间两个影响因素间均有一定的相互作用,根据等高线形状及疏密程度可看出,As和Cu中两个影响因素的相互作用最为显著,Cd、Pb和Zn次之,Cr相互作用较其他金属来说最弱。当养护时间不变时,随着改性剂掺量的增加,污泥中的重金属稳定效率均显著增加,且在5%~20%间等高线最密集,曲面坡度最大,因此对污泥中重金属的稳定效率影响最为

显著;而当掺量一定时,随养护时间的延长,其稳定效率增长速率较为平缓,因此在相互作用中改性剂的掺量占主要地位,对稳定效率影响更为显著。除此之外,在6种重金属的掺量、养护时间与稳定效率的回归曲面中,可决系数 R^2 皆在0.85以上,最大为Cu,可达到0.97,即此回归曲面可用于解释97%的因变量变化,拟合程度及相关性极高。通过分析可知掺量与养护时间两个影响因素的相互作用极强,对稳定效率的增加皆有显著的影响效果,这与唐建^[32]关于浓度及反应时间对重金属去除量影响显著且两者间具有较强交互作用的研究结果一致。

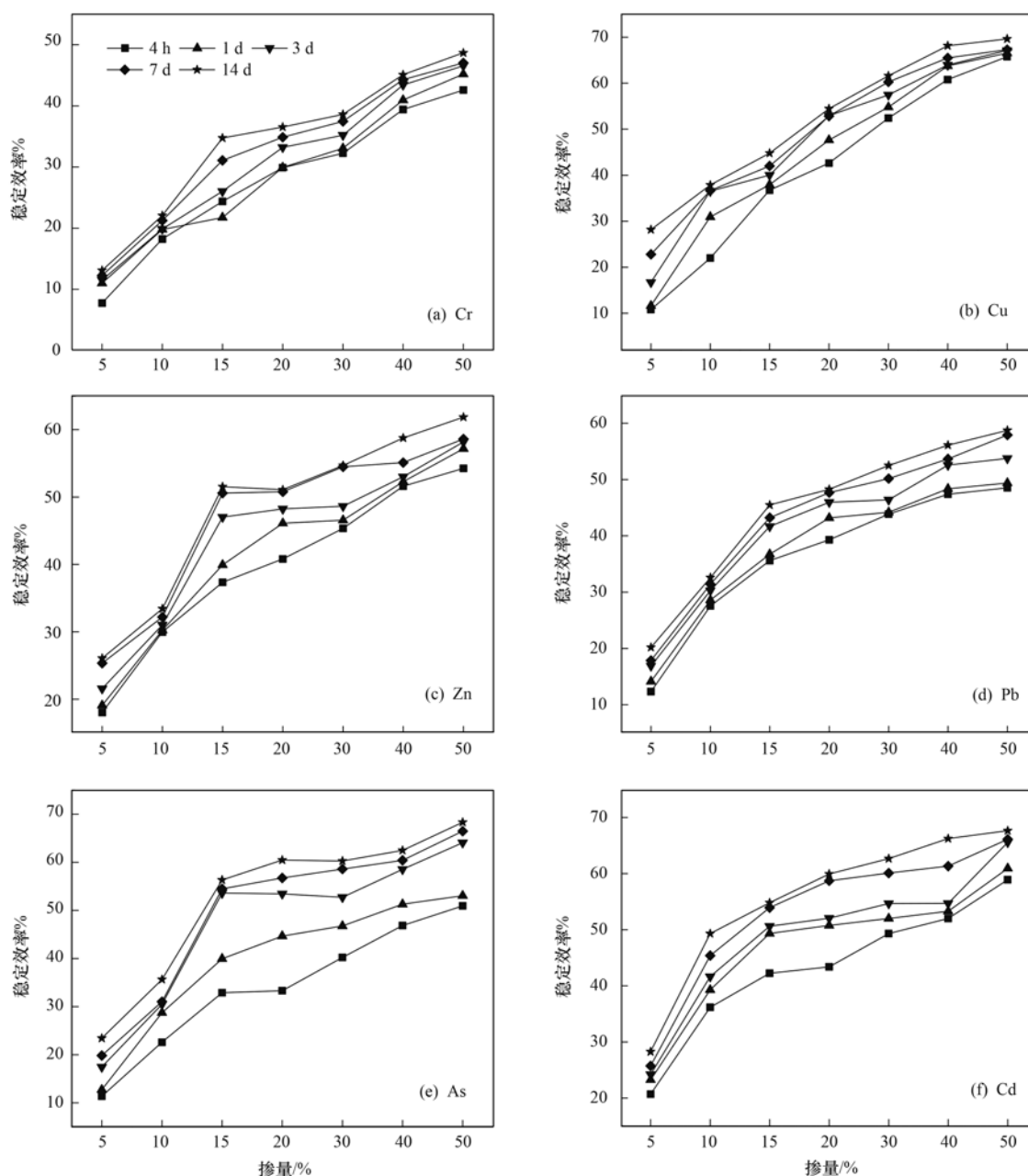


图4 不同掺量下重金属稳定效率变化情况

Fig. 4 Variation in stability efficiency with different contents

2.3 污泥改性前后重金属形态的变化

为分析不同重金属在污泥中的稳定性及潜在迁移性,使用BCR顺序提取法分别提取可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态^[33],其稳定性强弱为:可提取态<可还原态<可氧化态<残渣态.弱酸可提取态的重金属主要包括直接在水体中溶解的重金属、通过扩散作用和外层络合作用吸附在土壤表面的重金属、以沉淀和共沉淀形式存在于碳酸盐中心的重金属,可氧化态形式存在的重金属主要是有机物结合态^[34].

2.3.1 养护时间对污泥中重金属形态的影响

当污泥中掺入20%的改性剂后,改性污泥中重金属形态随养护时间的变化情况见图6.

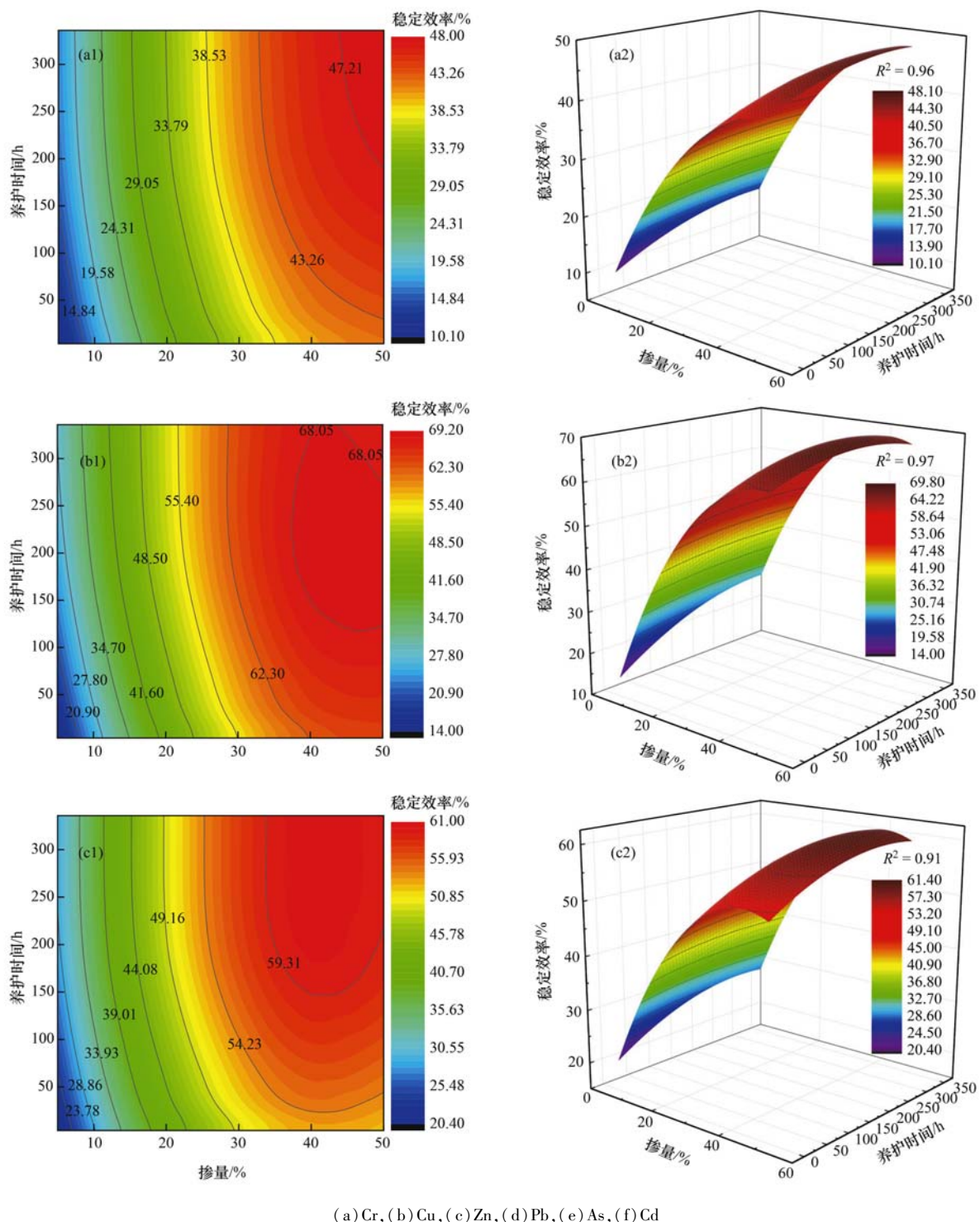
由图6可知,污泥原样中Cr和As以残渣态形式为主,且均超过50%,当掺入20%改性剂后,污泥中Cr和As都随着养护时间的延长,残渣态占比不断增加,尤其是As的残渣态比例大幅度提高,养护14 d后,所占比例高达95%.这说明改性剂对这两种重金属的稳定效果显著,随着养护时间的增加,污泥中的Cr和As潜在迁移性大幅度降低.原泥中Pb和Cu以可还原态形式为主,分别占61%和68%,说明具有一定的潜在迁移性,但在掺入改性剂后,可提取态和可还原态比例却不到2%,污泥中Pb的残渣态比例由原来的10%大幅度提高到90%左右,这说明改性剂在水化过程中与Pb反应生成氢氧化物,降低了Pb的溶解性;而Cu的残渣态比例略有提高,

但是可氧化态比例却由原来的 10% 上升到 70% 以上,根据 Fuentes 等^[35]的研究,这可能是由污泥的特性引起的.原泥中 Zn 和 Cd 以可提取态形式为主,分别为 54% 和 71%,污泥经改性后,可提取态比例均有所下降,其中 Zn 的残渣态随着养护时间的延长略有增加,而 Cd 的残渣态却略有减少,可还原态和可提取态却大幅度提高.这与李翔等^[6]对形态分析

的结果一致,其认为石灰干化污泥可明显减少 Zn 和 Pb 的弱酸提取态含量,不同程度地增加其余 3 种形态的含量,因此这两种重金属潜在迁移性较大,改性剂对其固化效果一般.

2.3.2 掺量对污泥中重金属形态的影响

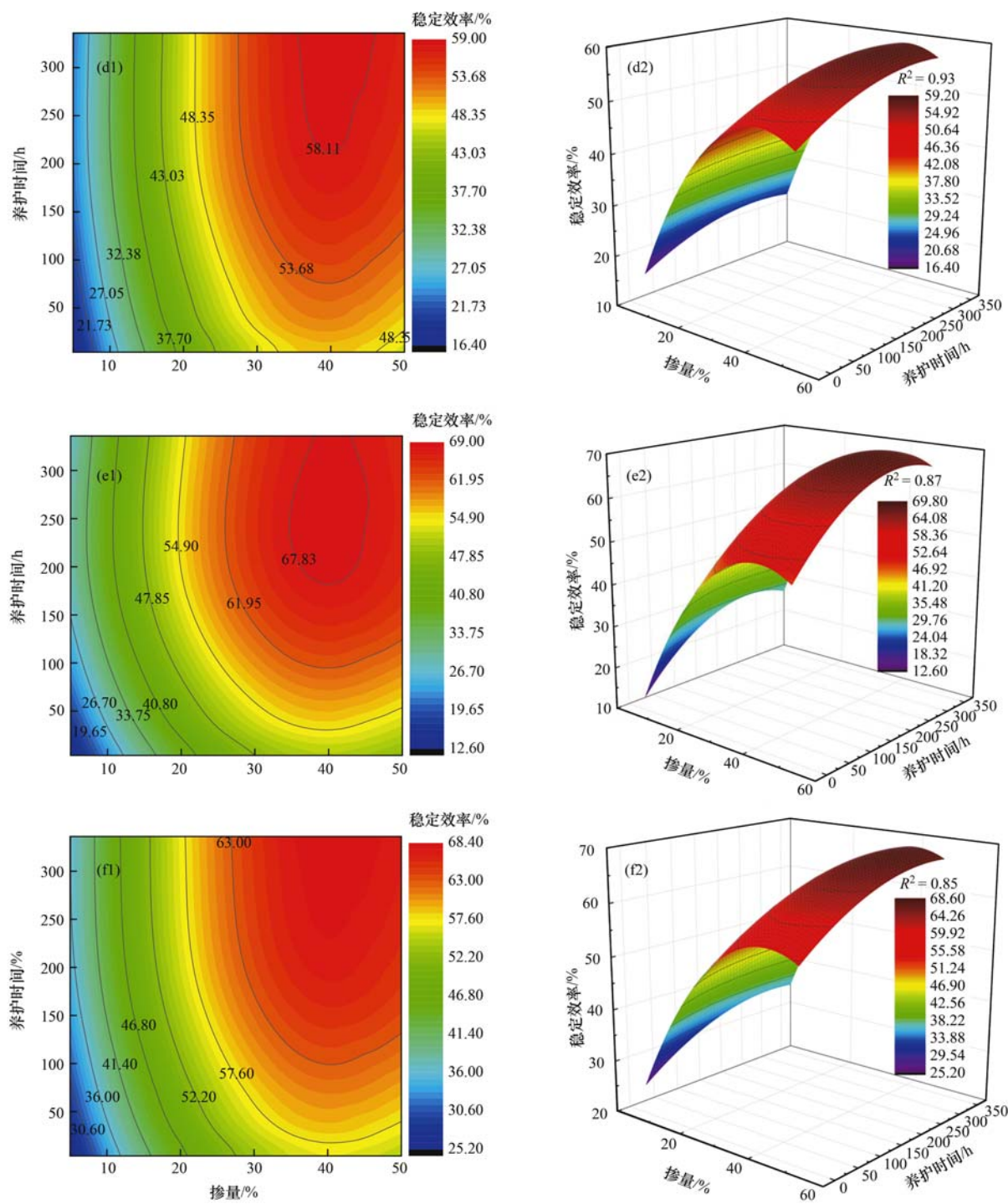
污泥在掺入矿渣基改性剂后,当养护时间为 3 d 时,改性污泥中重金属形态随改性剂掺量的变化情



(a) Cr, (b) Cu, (c) Zn, (d) Pb, (e) As, (f) Cd

图 5 掺量与养护时间相互作用等高线及 3D 回归曲面

Fig. 5 Contour map and 3D regression surface graph of interaction between content and curing time

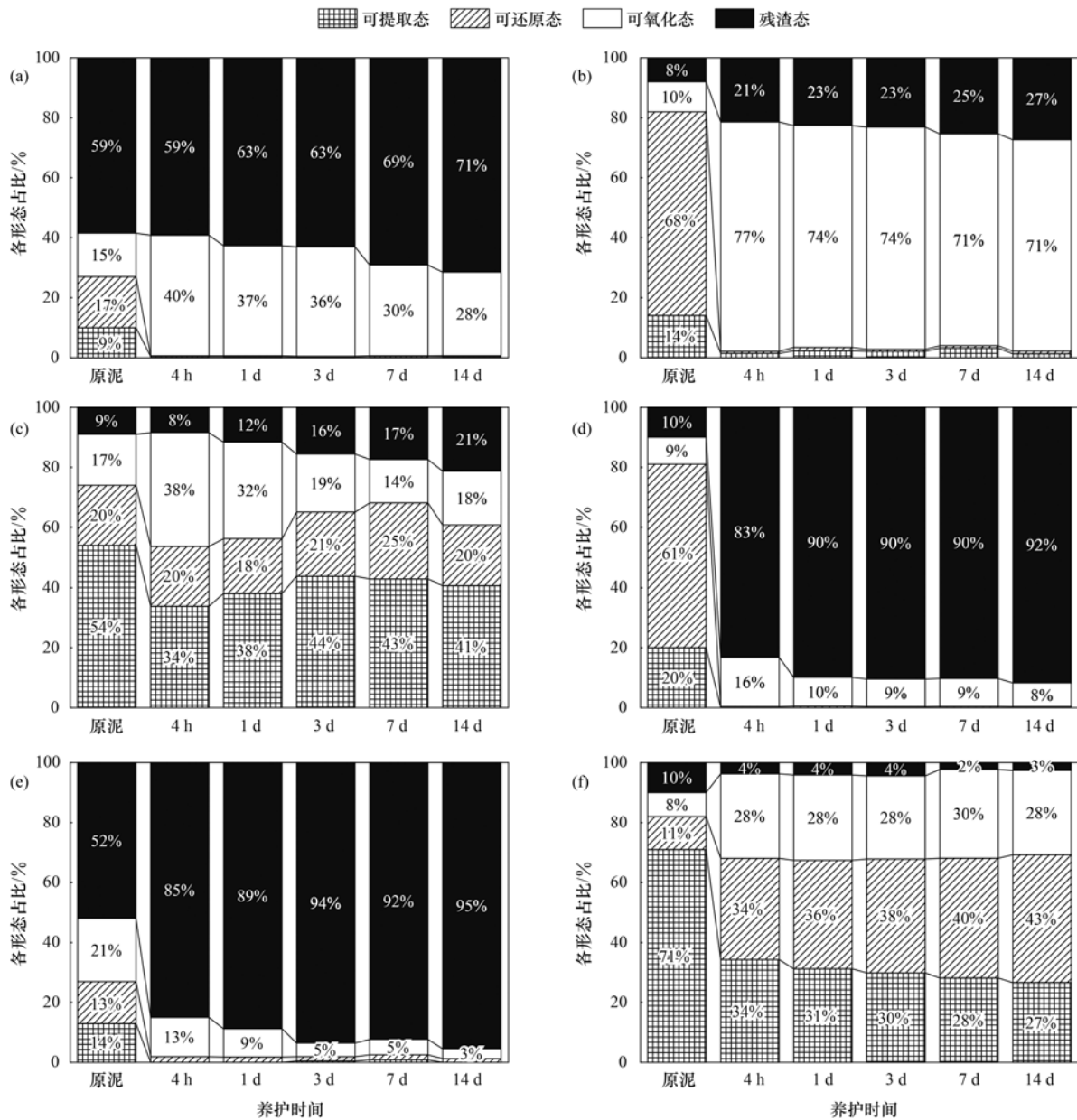


续图 5

况见图 7.

由图 7 可知, Pb 和 As 以残渣态的形式为主, 随掺量的增加, 残渣态比值不断增加, 说明改性剂对污泥中 Pb 和 As 的稳定效果不断加强. 在同一养护时间下, 残渣态随掺量增加的最大占比分别为 95% 和 97%, 说明这两种重金属经过改性后潜在迁移性大幅降低, 主要是由于 Pb 和 As 可形成碳酸盐化合物和氢氧化物并沉积在硅酸钙矿物上^[36], 从而导致固化效果显著增强. 污泥经过改性后, Cu 和 Cr 以可氧

化态和残渣态的形式为主, 其中 Cu 主要以可氧化态形式存在, 占比基本在 70% 以上, 残渣态随着掺量的增加略有提高; 而 Cr 随着改性剂掺量的增加, 残渣态占比不断提高, 可氧化态占比有一定的下降降低. 表明改性污泥中 Cu 和 Cr 具有一定的潜在迁移性, 但残渣态和可氧化态的占比之和随改性剂的掺量增加而提高, 说明改性剂对其具有一定程度的稳定效果, 主要是因为 Cu 和 Cr 被改性剂的水化产物所吸收, 形成化合物或者固溶于 C-S-H 凝胶



(a) Cr, (b) Cu, (c) Zn, (d) Pb, (e) As, (f) Cd; 掺量为 20%

图 6 不同养护时间对重金属形态的影响

Fig. 6 Effect of different curing times on heavy metal speciation

中^[37, 38]. Zn 和 Cd 主要以可氧化态、可还原态及可提取态形式存在, 其中残渣态较少, 可提取态占比最大, 随着改性剂掺量的增加, 可氧化态和可还原态的占比均有不同程度的增加, 而可提取态虽呈一定的下降趋势, 但残渣态所占的比例变化不明显, 因此这两种重金属潜在迁移性较大, 稳定化效果一般, 需给予更多的重视.

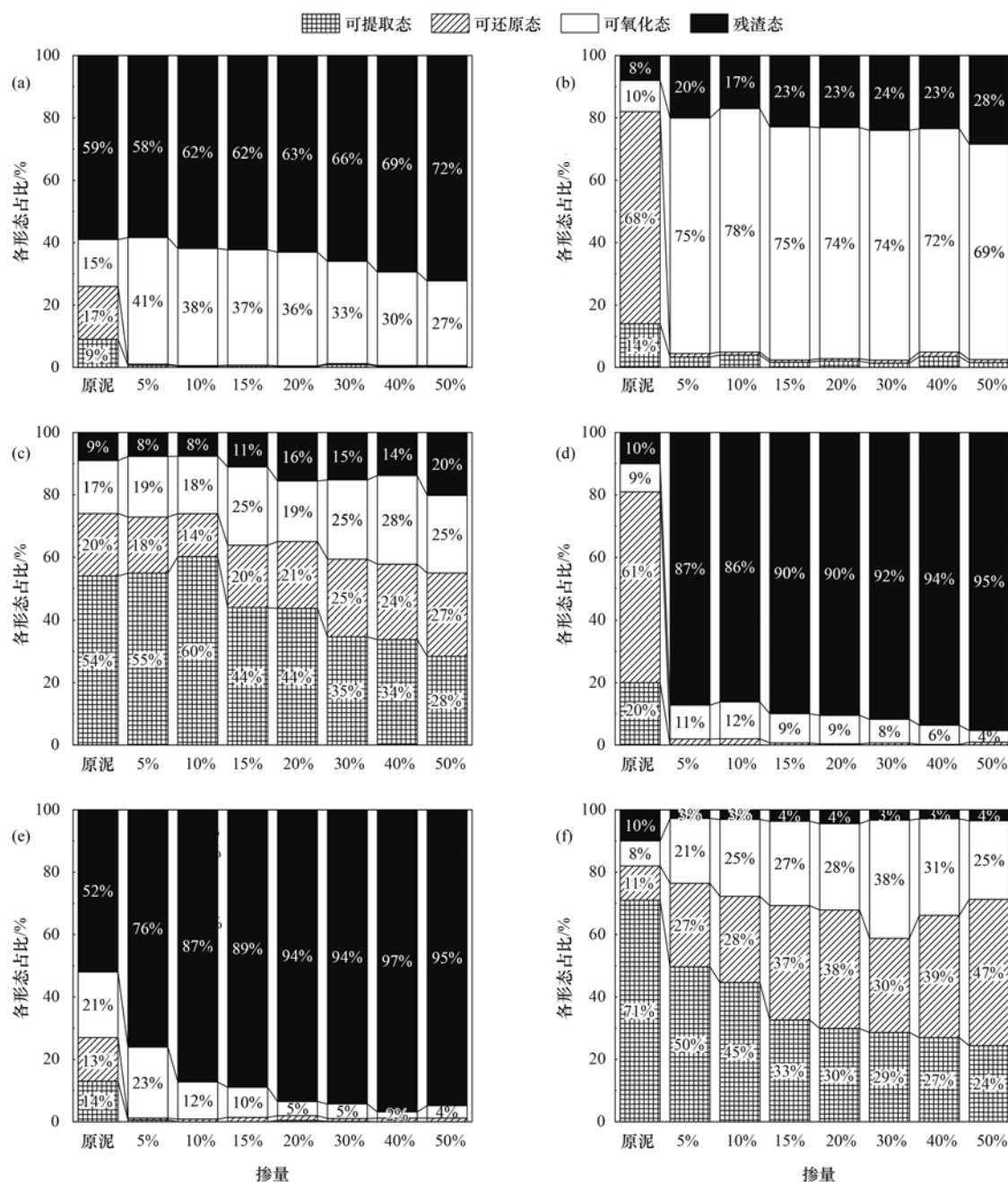
3 结论

(1) 污泥改性剂可有效提高污泥中 Cr、Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 等 6 种重金属的稳定效率, 随着养护时间的延长和改性剂掺量的增加, 对污泥中的重金属稳定效果越好. 当改性剂的掺量为 50%, 养护时

间为 14 d 时, 稳定效率达到最大, 分别为 Cu (69.62%) > As (68.35%) > Cd (67.63%) > Zn (61.86%) > Pb (58.73%) > Cr (48.68%).

(2) 对改性后污泥回归分析可知, 掺量和养护时间之间皆有一定的相互作用, 其中 As 和 Cu 最为显著, Cd、Pb 和 Zn 次之, Cr 相对最弱, 且掺量在相互作用中占较为主要地位. 在 6 种重金属掺量、养护时间与稳定效率的回归曲面中, R^2 皆在 0.87 以上, 其中 Cu 最大为 0.97, 拟合程度及相关性极高, 所以掺量与养护时间两个影响因素相互作用极强, 对稳定效率皆有显著的影响效果.

(3) 污泥经过改性后, 6 种重金属残渣态皆有不同程度增大, 养护时间或掺量越大, 增长越明显. Pb



(a) Cr, (b) Cu, (c) Zn, (d) Pb, (e) As, (f) Cd; 养护时间为 3 d

图 7 不同掺量对重金属形态的影响

Fig. 7 Effect of different contents on heavy metal speciation

和 As 以残渣态形式为主,潜在迁移性较低,稳定效果最为明显; Cu 和 Cr 以可氧化态和残渣态形式为主,但 Cu 和 Cr 分别以可氧化态和残渣态形态为主,具有一定的潜在迁移性; Zn 和 Cd 以可还原态、可提取态形式为主,潜在迁移性较大,稳定效果一般。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. “十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-01/23/content_5162482.htm, 2016-12-31.
- [2] 田中科, 王芬, 闫钊. 中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5106-5113.

Tian Z K, Wang F, Yan Z. Effects of mesophilic anaerobic digestion and thermophilic anaerobic digestion on the risk and stability of heavy metals in sludge[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5106-5113.

- [3] 解道雷, 孔慈明, 徐龙乾, 等. 城市污泥中重金属存在形态、去除及稳定化研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(1): 330-342.
- Xie D L, Kong C M, Xu L Q, et al. Developments of the speciation, removal and stabilization of heavy metals in municipal sludge[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(1): 330-342.
- [4] Du F Z, Freguia S, Yuan Z G, et al. Enhancing toxic metal removal from acidified sludge with nitrite addition [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(10): 6257-

- 6263.
- [5] 王维兵. 掺入污泥的磷酸镁水泥的制备及其固化重金属的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Wang W B. Preparation of magnesium phosphate cement mixed with sludge and study on its solidification of heavy metals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [6] 李翔, 宋云, 刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1946-1954.
Li X, Song Y, Liu Y B. Leaching behavior of Pb, Cd and Zn from soil stabilized by lime stabilized sludge[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1946-1954.
- [7] Samaras P, Papadimitriou C A, Haritou I, *et al.* Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **154**(1-3): 1052-1059.
- [8] Lim S, Jeon W, Lee J, *et al.* Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess[J]. Water Research, 2002, **36**(17): 4177-4184.
- [9] 肇庆市珈旺环境技术研究院. 一种污泥混烧灰重金属固化稳定化的方法[P]. 中国专利: CN 201910271961.9, 2019-06-21.
- [10] Graich A, Bellarbi A, Khaidar M, *et al.* Using portland cement to stabilize/solidify sludge residue from treatment of cardboard plant wastewater [J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2020, **24**(3), doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000506.
- [11] 鄢琪慧, 倪文, 高巍, 等. 矿渣-钢渣基胶凝材料固砷机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(7): 1544-1550.
Yan Q H, Ni W, Gao W, *et al.* Mechanism for solidification of arsenic with blast furnace slag-steel slag based cementitious materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, **50**(7): 1544-1550.
- [12] 毛林清. 碱激发胶凝材料固化/稳定化含铬电镀污泥研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Mao L Q. Solidification/stabilization of chromium-bearing electroplating sludge with alkali-activated cementitious materials [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [13] 黄丽萍, 马倩敏, 郭荣鑫, 等. 碱矿渣胶凝材料水化产物的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, **39**(4): 1194-1200.
Huang L P, Ma Q M, Guo R X, *et al.* Experimental study on hydration products of alkali-activated slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, **39**(4): 1194-1200.
- [14] Guerrini I A, Croce C G G, de Carvalho Bueno O, *et al.* Composted sewage sludge and steel mill slag as potential amendments for urban soils involved in afforestation programs [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, **22**: 93-104.
- [15] Chen H X, Yuan H H, Mao L Q, *et al.* Stabilization/solidification of chromium-bearing electroplating sludge with alkali-activated slag binders [J]. Chemosphere, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124885.
- [16] 张大捷, 刘文士, 田晓峰, 等. 矿渣胶结材料固化处理垃圾焚烧灰[J]. 环境工程, 2008, **26**(4): 14-16.
Zhang D J, Liu W S, Tian X F, *et al.* Solidification of municipal solid waste incineration fly ash by slag cementitious material[J]. Environmental Engineering, 2008, **26**(4): 14-16.
- [17] 申锐莉, 周旻, 曾明中, 等. 污染土壤中重金属铅的钝化及其机理[J]. 资源环境与工程, 2016, **30**(4): 604-607.
Shen R L, Zhou M, Zeng M Z, *et al.* Passivation of Pb-contaminated soil and its mechanism[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, **30**(4): 604-607.
- [18] Huang X, Huang T, Li S, *et al.* Immobilization of chromite ore processing residue with alkali-activated blast furnace slag-based geopolymer[J]. Ceramics International, 2016, **42**(8): 9538-9549.
- [19] 何哲祥, 肖威, 李翔, 等. 基于高炉渣的土壤重金属稳定/固化剂[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, **48**(7): 1957-1963.
He Z X, Xiao W, Li X, *et al.* Soil heavy metal solidification/stabilization agent based on blast furnace slag [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, **48**(7): 1957-1963.
- [20] Jin F, Al-Tabbaa A. Evaluation of novel reactive MgO activated slag binder for the immobilisation of lead and zinc [J]. Chemosphere, 2014, **117**: 285-294.
- [21] HJ 557-2010, 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法[S].
- [22] Method 1311, Toxicity characteristic leaching procedure[S].
- [23] 章骅, 何晶晶, 吕凡, 等. 重金属在环境中的化学形态分析研究进展[J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 130-137.
Zhang H, He P J, Ly F, *et al.* A review on the methods for investigating heavy metal speciation in environmental chemistry [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(1): 130-137.
- [24] 李华, 司马菁珂, 罗启仕, 等. 危险废物焚烧飞灰中重金属的稳定化处理[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3740-3746.
Li H, Sima J K, Luo Q S, *et al.* Stabilization of heavy metals in hazardous waste incineration fly ash [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(10): 3740-3746.
- [25] 郭广慧, 陈同斌, 杨军, 等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2455-2461.
Guo G H, Chen T B, Yang J, *et al.* Regional distribution characteristics and variation of heavy metals in sewage sludge of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(10): 2455-2461.
- [26] CJ/T 309-2009, 城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质[S].
- [27] GB 5085.3-2007, 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别[S].
- [28] Shikazono N, Tatewaki K, Mohiuddin K M, *et al.* Sources, spatial variation, and speciation of heavy metals in sediments of the Tamagawa River in central Japan [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2012, **34**(S1): 13-26.
- [29] 于贺, 邱春生, 王晨晨, 等. Fenton 预处理对城市污泥重金属形态及生物淋滤溶出影响[J]. 环境工程学报, 2019, **13**(3): 725-731.
Yu H, Qiu C S, Wang C C, *et al.* Influence of Fenton pretreatment on heavy metal speciation and bioleaching efficiency in municipal sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, **13**(3): 725-731.
- [30] 陈巍. 脱硫灰改善污泥脱水性能的机理及用于水泥掺料的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
Chen W. Research on the mechanism of improving sewage sludge dewaterability with desulfurization ash and its application as cement admixture [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [31] 张倩. 掺污泥水泥基材料的力学性能及重金属固化能力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Zhang Q. Study on mechanical properties and heavy metal curing capacity of cement-based materials mixed with sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [32] 唐建. 生物表面活性剂耦合电力去除污泥重金属研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

- Tang J. Combined biosurfactants and electrokinetic treatment remove heavy metals from sludge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [33] Yu M, Zhang J, Tian Y. Change of heavy metal speciation, mobility, bioavailability, and ecological risk during potassium ferrate treatment of waste-activated sludge[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25** (14): 13569-13578.
- [34] 傅凤霞. 污泥干化处理中重金属迁移特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Fu F X. Mobility of heavy metals of sewage sludge submitted to drying process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [35] Fuentes A, Lloréns M, Sáez J, *et al.* Simple and sequential extractions of heavy metals from different sewage sludges[J]. Chemosphere, 2004, **54**(8): 1039-1047.
- [36] Chen Q Y, Tyrer M, Hills C D, *et al.* Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: a review[J]. Waste Management, 2009, **29**(1): 390-403.
- [37] Guo B, Liu B, Yang J, *et al.* The mechanisms of heavy metal immobilization by cementitious material treatments and thermal treatments: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, **193**: 410-422.
- [38] 毛雁鸿. 碱矿渣胶凝材料固化铅锌冶炼渣实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020 年 12 月 29 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 19 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

环境科学

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)